

激光掩星探测大气水汽混合比的数值模拟

洪光烈^{1*}, 李虎^{1,3}, 王一楠², 李家唐^{1,3}, 陈少杰^{1,3}

¹中国科学院上海技术物理研究所中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在低轨道空间站和伴飞卫星上分别安置激光发射机和接收机,同时发射和接收 935 nm 短波红外水汽探测激光束脉冲对和 765 nm(位于氧气的 A 吸收带)近红外激光束脉冲对。935 nm 波段激光脉冲的一个探测波长对水汽的吸收较强,另一个参考波长对水汽的吸收相对较弱;765 nm 波段激光脉冲的一个波长对氧气的吸收较强和另一个波长对氧气的吸收较弱。光连线全程的双波长差分光学厚度和连线切点处的差分消光系数之间存在 Abel 变换关系。基于 Abel 积分变换,利用理想气体状态定律和大气准静态方程,用大气模式作为初值条件,进行数值计算。765 nm 波长对用来反演大气的压强和温度,935 nm 波长对用来反演大气水汽的密度。获得的水汽廓线分布的仿真结果以及误差分布表明,激光掩星具有探测对流层上-平流层下这一高度(5~14 km)的水汽含量的潜力。

关键词 大气光学; 水汽混合比; 差分光学厚度; 差分消光系数; Abel 变换

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0401001

Number Simulation for Laser Occultation Measurement of Atmospheric Vapor Mixing Ratio

Hong Guanglie^{1*}, Li Hu^{1,3}, Wang Yinan², Li Jiatang^{1,3}, Chen Shaojie^{1,3}

¹Key Laboratory of Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Beijing 100029, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A laser transmitter and receiver are respectively arranged on the low-orbit space station and its companion satellite. Both the 935-nm short-wave infrared band vapor detection laser beam pulse pair and 765-nm near-infrared band laser beam pulse pair (located in the oxygen absorption A-band) are transmitted and received simultaneously. One detection wavelength of the 935-nm band pulse pair strongly absorbs water vapor and other reference wavelength exhibits relatively weak absorption of water vapor; one wavelength of the 765-nm band is strongly absorbed by oxygen and other wavelength is weakly absorbed by oxygen. An Abel transformation relation exists between the two-wavelength differential optical depth of the entire optical connection and differential extinction coefficient at the tangent point of the connection. Based on Abel integral transformation, the numerical calculation is performed using the ideal gas law and the atmospheric quasi-static equation, taken the atmospheric model as the initial condition. The 765-nm wavelength pair is used to invert the atmospheric pressure and temperature, whereas 935-nm wavelength pair is used to invert the atmospheric water vapor density. Simulation results and error distribution of the water vapor profile distribution are obtained. Results show that laser occultation has the potential to detect the level of water vapor in the troposphere-stratosphere (5–14 km).

Key words atmospheric optics; mixing ratio of vapor; differential optical depth; differential extinction coefficient; Abelian transformation

OCIS codes 010.1030; 010.1320; 280.4788; 120.6780; 280.5475

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-10-17; 录用日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(61775227)、中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室开放基金

* E-mail: glhong@mail.sitp.ac.cn

1 引 言

对流层上-平流层下的水汽含量对于全球气候影响明显,对其进行观测和监视意义重大。然而地球大气层这一区间的水汽含量远低于对流层下半部,且其分布的变化梯度较大,因此对其探测的灵敏度和垂直分辨率提出了较高的要求。风云3号-C全球导航系统(GNSS)射频掩星(RO)技术的地球大气水汽探测已经得到证实,对比气象学实验(GPS/MET)设备在过去十多年测量的几万个廓线数据得出,在1~40 km的高度范围内,温度统计一致性平均在1 K水平。CHAMP, COSMIC 和 Metop/GRAS 等掩星任务,还有 FORMOSAT-7/COSMIC-2 项目^[1],已经得以执行。射频掩星测量结果能够转换成大气弯曲角廓线^[2],应用 Abel 变换,再将弯曲角廓线处理成折射率廓线。鉴于 GRO (GPS Radio Occultation) 技术^[3]在大气热力学参量廓线测量中的成功运用,欧洲在 ACCURATE (Atmospheric Climate and Chemistry in the UTLS Region and Climate Trends Explorer) 计划^[4]中提出了在近地轨道(LEO)卫星构成的掩星星座上搭载红外激光发射机和接收机(LIO)以及微波发射机和接收机(LMO)的设想^[5],采用主动临边探测的方式进行大气成分和风速的测量,即激光差分吸收与掩星探测相结合的红外激光掩星技术^[6],其中的微波掩星数据用于探测大气温度和压强廓线,为温室气体浓度分布廓线的反演提供了大气状态参数。LMIO 探测技术是微波掩星和红外激光(波长大约

2.0 μm)掩星技术的复合,即用微波掩星探测大气状态参数的温度和压强,然后将其探测数据提供给红外激光掩星,作为 LMIO 反演温室气体浓度的条件。但因为其射频波束宽、发散角较大,以及射频波束存在多径效应,利用射频掩星探测大气水汽时高程的距离分辨率低,故难以满足对流层上-平流层下区间大气物理研究的要求。

本文提出 0.765 μm/0.935 μm 双波段激光掩星技术,用于测量地球对流层上-平流层下的水汽浓度廓线。建立针对 UTLS (upper troposphere-lower stratosphere)区域水汽浓度廓线的探测仿真模型,通过 0.765 μm 激光掩星,测量氧气的吸收光学厚度,反演大气温度和压强,并作为反演水汽的输入条件(与 ACCURATE 计划的主要差别),利用 0.935 μm 的掩星对 UTLS 区域水汽浓度廓线的探测性能进行仿真分析。

2 反演基本原理

2.1 掩星模型

利用激光掩星的几何学测量技术,临边探测(limb sounding)大气,由于其具有很长的积分路径,故可以以很高的灵敏度对大气进行分层采样,示意图如图1所示,其中 Tx 为发射机, Rx 为接收机, D_{TR} 为收/发之间的距离, r_{Tx} 为发射机所在位置到地球中心的矢径, r_{Rx} 为接收机所在位置到地球中心的矢径, V_{Tx} 为发射机所在卫星飞行速度, V_{Rx} 为接收机所在卫星飞行速度。

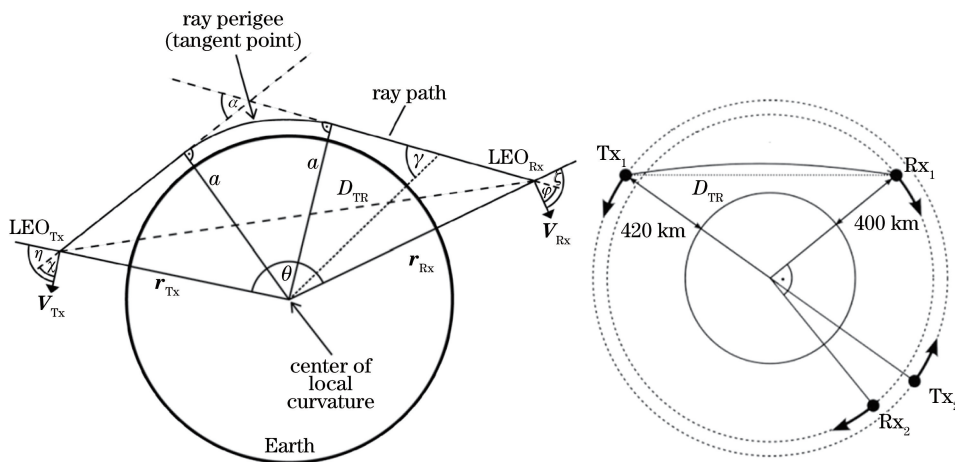


图1 激光掩星临边探测的几何学示意图

Fig. 1 Geometry of laser occultation limb sounding

具有不同的吸收截面的波长对将被用来增加 UTLS 区域观测的动态范围。新的激光掩星观测,将获得一个更加完整和准确的水汽廓线表征。为了

补偿大气温度和大气压强对反演精度的影响,不仅发射和接收 0.935 μm 短波红外水汽探测激光束脉冲对^[7][图 2(a)],同时发射和接收 0.765 μm(位于

氧气的 A 吸收带) 近红外激光束脉冲对^[8] [图 2(b)], 以提供大气压强和大气温度数据。实际上是以大气中体积相对含量不变的氧气作为参考气体, 求出水汽在大气中的混合比。在地球低轨道上, 基于空间站和伴飞小卫星安置光接收机和激光发射机, 当空间站和小卫星相对运动时, 激光束横向穿过大气层, 由发射功率和接收信号强度计算出整条光路径上双波长的透过率比, 进而计算整条路径的差分光学厚度; 再由一系列射线的差分光学厚度数值, 根据 Abel 积分变换^[9], 换算出大气路径上切点处水汽对光束差分吸收系数, 进一步计算出穿过大气层路径切点处水汽的浓度随高度的变化, 得到离地球表面垂直距离 5~14 km 水汽分布廓线。

$$\alpha_1(a_0) - \alpha_2(a_0) =$$

$$-\frac{1}{\pi} \frac{da}{dr} \Big|_{a=a_0} \int_{a_0}^{\infty} \frac{d(\tau_1 - \tau_2)}{da} \frac{da}{(a^2 - a_0^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

式中: a 和 a_0 是发射机和接收机大气之间光束路径的特征常数, 对于同一路径上所有点而言, 此常数 a ($a = \mu r \sin \gamma$) 的数值不变, μ 为射线某点的折射率, r 为射线上该点的曲率半径(地球半径 R_c 加上该点高度 z_i), γ 为该点矢径 r 与光轨迹射线的夹角; a_0 是 Abel 积分的初始值, 也就是被计算射线的 a 值; α 表示消光系数; τ 表示整条光束路径的光学厚度, 下标注 1 代表探测波长 online, 下标注 2 代表参考波长 offline。激光掩星模型的参数如表 1 所示。

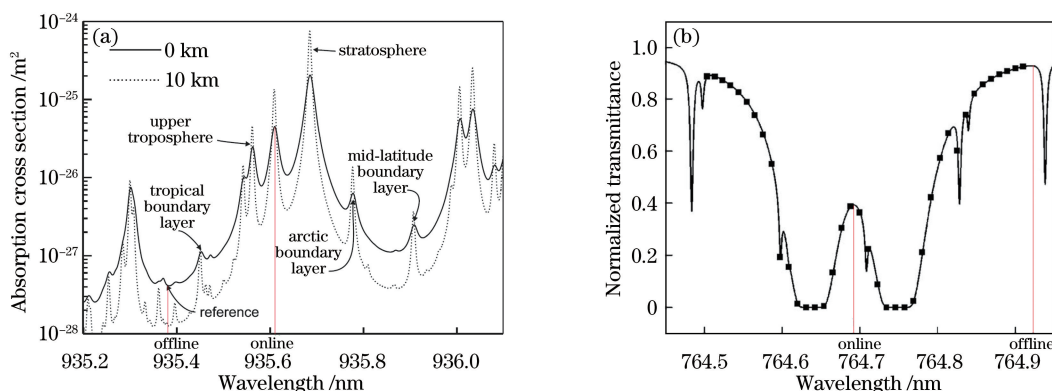


图 2 水汽吸收和氧气透射光谱。(a)水汽的 935 nm 近红外谱段吸收光谱(选择探测波长对温度不敏感);

(b)自高度 13 km 到地面,764.7 nm(位于氧气的 A 吸收带)的美国标准大气透射光谱(选择探测波长对温度不敏感)

Fig. 2 Absorption and transmittance spectra. (a) Absorption spectrum of water vapor in the NIR region near 935 nm (Selected detection wavelength is not sensitive to temperature); (b) atmospheric transmittance spectrum from a 13 km altitude showing the oxygen A-band absorption line at 764.7 nm using a standard US atmosphere (Selected detection wavelength is not sensitive to temperature)

表 1 激光掩星模型的参数

Table 1 Parameters of the laser occultation model

Parameter	Value	Introduction
Emission wavelength	0.765 μm (764.688 nm/764.918 nm), 0.935 μm (935.607 nm/935.390 nm)	Double wavelength pairs of online and offline
Emission spectrum	Linewidth $\Delta f/f_0 < 3 \times 10^{-8}$; spectral purity > 36 dB	
Laser pulse power	1.5 W	DFB semiconductor laser+semiconductor optical amplifier
Laser pulse time width	1.5 ms	Acoustic-optic chopper
Laser pulse repetition rate	50 Hz	
Laser divergence angle	~ 3.0 mrad	
Reception telescope	$\Phi 36$ cm	Cassegrain
Field of view	~ 1.0 mrad	
Detector noise equivalent power	8×10^{-13} W per 2 ms	2 ms observation time for a pulse
Detector dynamic range	NEP $\sim 2 \times 10^{-9}$ per 2 ms	
Orbital altitude	400 km	Low-earth-orbit

Note;DFB represents distributed feedback; NEP represents noise equivalent power.

2.2 模拟仿真的初值条件

将美国标准大气模式^[10] (the US standard atmosphere 1976), 作为迭代运算的初始条件。温度 $T(z_i)$ 单位为 K, 大气压强 $P(z_i)$ 单位为 Pa, 高度 z_i 单位为 m。

距离海平面 4~11 km 的大气层温度和压强表示为

$$\begin{cases} T(z_i) = 288.15 - 0.006545z_i \\ P(z_i) = 1.013 \times 10^5 \left[\frac{288.15}{T(z_i)} \right]^{(-\frac{0.034164}{0.006545})} \end{cases}, \quad (2)$$

11~20 km 大气层温度和压强表示为

$$\begin{cases} T(z_i) = 216.65 \\ P(z_i) = 2.269 \times 10^4 \exp\left[\frac{-0.034164(z_i - 11000)}{216.65} \right] \end{cases}, \quad (3)$$

20~32 km 的大气层温度和压强可以表示为

$$\begin{cases} T(z_i) = 216.65 + 0.0010(z_i - 20000) \\ P(z_i) = 5528.0 \left[\frac{216.65}{T(z_i)} \right]^{(\frac{0.034164}{0.0010})} \end{cases}, \quad (4)$$

32~47 km 大气的温度和压强表示为

$$\begin{cases} T(z_i) = 228.65 + 0.0028(z_i - 32000) \\ P(z_i) = 888.8 \left[\frac{228.65}{T(z_i)} \right]^{(\frac{0.034164}{0.0028})} \end{cases}. \quad (5)$$

根据理想气体状态定律, 干空气的分子数密度 n_{air} (单位为 m^{-3}) 与大气压强及大气温度的关系可以表示为

$$n_{\text{air}}(z_i) = \frac{1}{1.3807 \times 10^{-23}} \frac{P(z)}{T(z)}. \quad (6)$$

大气中氧气分子的体积混合比是一定的, 为 20.949%, 因此氧气分子密度 n_{O_2} 与大气压强和温度关系为

$$n_{\text{O}_2}(z_i) = \frac{20.949\%}{1.3807 \times 10^{-23}} \frac{P(z_i)}{T(z_i)} = 1.517 \times 10^{22} \frac{P(z_i)}{T(z_i)}. \quad (7)$$

Bönsch 等^[11] 于 1998 年给出了大气折射系数 $N(z_i)$ 与大气压强、大气温度和大气湿度的关系表达式, 即

$$N(z_i) = \left(0.237104 + \frac{68.3934}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{0.45473}{38.9 - \lambda^{-2}} \right) \frac{P(z_i)}{T(z_i)} - 0.00038e(z_i), \quad (8)$$

式中: 波长 λ 的单位为 μm ; 干空气压强 $P(z_i)$ 的单位为 Pa; 大气温度 $T(z_i)$ 的单位为 K; $e(z_i)$ 水汽的分气压, 单位为 Pa。

折射率可表示为

$$\mu(z_i) = 1 + 10^{-6} \times N(z_i). \quad (9)$$

掩星光路径曲线的特征参数 a_i 可表示为

$$a_i = \mu(z_i)r(z_i) = \mu(z_i)(z_i + R_C). \quad (10)$$

式中: R_C 为地球的半径。

2.3 干空气的分子密度 $n_{\text{air}}(z_i)$ 压强 $P(z_i)$ 和温度 $T(z_i)$ 的迭代计算

如果从发射机发射 764.7 nm 和 764.9 nm 两种波长的激光, 他们的波长相近, 但是对氧气的吸收差别较

大, 他们经过掩星路径后, 光透过率存在明显差别, 因而光学厚度存在明显差别。差分光学厚度可表示为

$$\Delta\tau = \tau_{1\text{O}_2} - \tau_{2\text{O}_2} = \ln\left(\frac{I_{1\text{O}_2}}{I_{1\text{O}_2}} \frac{I_{2\text{O}_2}}{I_{2\text{O}_2}} \right), \quad (11)$$

式中: I 表示发射或接收光信号强度。

发射端和接收端相对运动, 连接两者之间的射线有很多条, 每一条连线都有一个特征值 a [可从 (10) 式求得], 根据连线一端卫星的双波长发射功率和连线另一端卫星的双波长接收信号, 利用 (11) 式可求得一个相对的光学厚度差数值。

计算 765 nm 光折射系数时, 忽略水汽对折射系数的影响。765 nm 的光折射系数为

$$\begin{aligned} N_{765}(z_i) &= \left(0.237104 + \frac{68.3934}{130 - 0.765^{-2}} + \frac{0.45473}{38.9 - 0.765^{-2}} \right) \frac{P(z_i)}{T(z_i)} = \\ &6.59 \times 10^{-23} n_{\text{O}_2} \left(0.237104 + \frac{68.3934}{130 - 0.765^{-2}} + \frac{0.45473}{38.9 - 0.765^{-2}} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

初始的 $P(z_i)$ 和 $T(z_i)$ 值取自于大气模式, 765 nm 折射率为

$$\mu_{765}(z_i) = 1 + 10^{-6} \times N_{765}(z_i). \quad (13)$$

掩星光路径曲线的特征参数为

$$a_{i765} = \mu(z_i)_{765} r(z_i) = \mu(z_i)_{765} (z_i + R_C). \quad (14)$$

由 Abel 变换得到的差分消光系数 $\Delta\alpha_{\text{O}_2}$ 为

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{\text{O}_2} &= \alpha_{1\text{O}_2}(a_0) - \alpha_{2\text{O}_2}(a_0) = \\ &-\frac{1}{\pi} \frac{da}{dr} \Big|_{a=a_0} \int_{a_0}^{\infty} \frac{d(\tau_{1\text{O}_2} - \tau_{2\text{O}_2})}{da} \frac{da}{(a^2 - a_0^2)^{1/2}}. \end{aligned} \quad (15)$$

氧气的差分消光系数 $\Delta\alpha_{O_2}$, 也即 $n_{O_2}(\sigma_{1O_2} - \sigma_{2O_2})$, 其中 σ_{1O_2} 为较强吸收截面, σ_{2O_2} 为较弱吸收截面。消光系数当中包括气溶胶的消光系数、大气分子的散射系数、氧气之外的其他大气成分的吸收系数、氧气的吸收系数等, 由于双波长相近, 故可近似认为差分消光系数 $\Delta\alpha_{O_2}$ 主要反映掩星光束路径上切点处氧气的吸收系数差。基于 MATLAB 程序求解 $\Delta\tau(a)$ 在 Abel 变换下的数值积分和数值微分, 得到 $\Delta\alpha_{O_2}$ 。 $(\sigma_{1O_2} - \sigma_{2O_2})$ 是大气压强 $P(z_i)$ 和温度 $T(z_i)$ 的函数, 选择氧气通道掩星波长 $0.765 \mu\text{m}$, 使得氧气的吸收截面 $(\sigma_{1O_2} - \sigma_{2O_2})$ 是温度的弱函数, 是压强的强函数。以大气压强 $P(z_i)$ 和温度 $T(z_i)$ 为变量, 从 HITRAN 数据库得到 $(\sigma_{1O_2} - \sigma_{2O_2})$ 。采用前向积分还是后向积分, 取决于发射机与接收机之间的连线是逐渐上升(相向而行, 跃出地平线), 还是下降(背向而行, 落入地平线)。不同高度处的氧气分子密度可表示为

$$n_{O_2}(z_i) = \frac{\alpha_{1O_2}(z_i) - \alpha_{2O_2}(z_i)}{\sigma_{1O_2}(P) - \sigma_{2O_2}(P)} \quad (16)$$

根据大气压强准静态方程, 可以得

$$dP(z_i) = -n(z_i)mgdz = -n_{O_2}(z_i) \frac{mg}{0.20949} dz, \quad (17)$$

式中: g 为重力加速度, 9.8 N/kg ; m 为空气的平均单分子质量。(17)式经过离散化, 可以得到压强的廓线 $(z_i - z_{i+1})$ 相当于高程距离分辨率, 即

$$P(z_{i+1}) - P(z_i) = \frac{n_{O_2}(z_i) + n_{O_2}(z_{i+1})}{2} \frac{0.028964g}{20.949\%N_A} (z_i - z_{i+1}), \quad (18)$$

式中: 阿伏加德罗常数 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}$ 。根据理想气体状态定律可得

$$T(z_i) = 1.517 \times 10^{22} \frac{P(z_i)}{n_{O_2}(z_i)} \quad (19)$$

用(18)式、(19)式得到的大气压强 $P(z_i)$ 和大气温度 $T(z_i)$ 代替 U.S 1976 大气模式数值, 从(12)式进入新的循环。

利用 765 nm 激光掩星反演大气温度和干大气压强的迭代运算框图, 如图 3 所示。

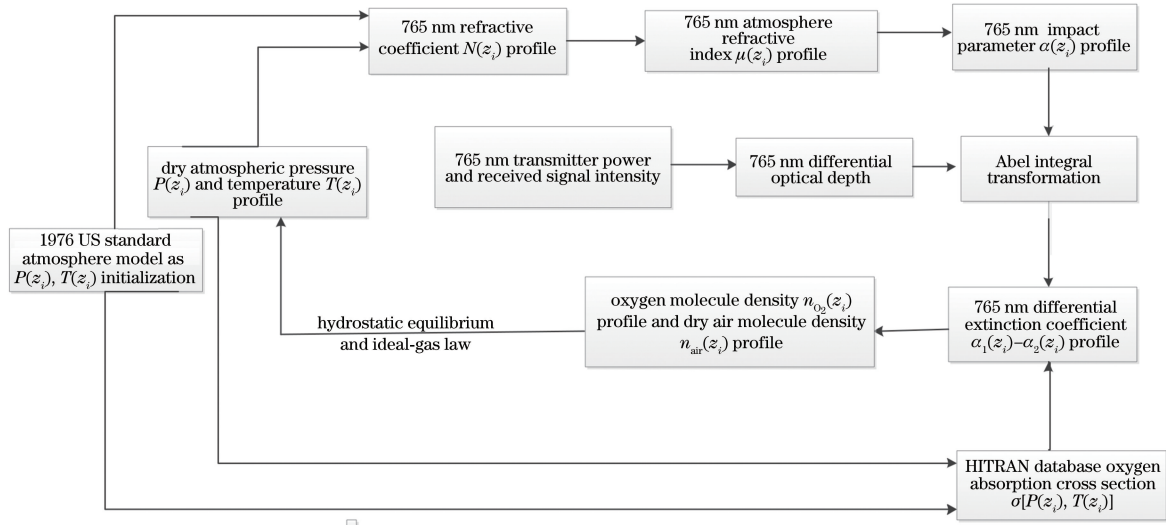


图 3 从 765 nm 激光掩星反演干空气大气温度和大气压强的计算流程图

Fig. 3 Flow chart for retrieval atmospheric temperature and pressure from $0.765 \mu\text{m}$ laser occultation

大致的计算顺序如下: 首先采用 US 1976 大气模型中的大气压强 $P(z_i)$ 和大气温度数值 $T(z_i)$, 作为初始值, 计算大气的 765 nm 光折射系数廓线 $N(z_i)$, 紧接着计算大气的 765 nm 光折射率 $\mu(z_i)$ 廓线, 连接发射机和接收机的光线轨迹参数 $a_{765}(z_i)$ 廓线, 由差分光学厚度 $\Delta\tau_{O_2}(z_i)$ 经过 Abel 变换, 计算差分吸收系数 $\Delta\sigma_{O_2}(z_i)$, 在大气压强 $P(z_i)$ 和大气温度 $T(z_i)$ 约束下, 通过 HITRAN 数据库获取差分吸收截面 $\Delta\sigma_{O_2}(z_i)$, 由差分消光系数 $\Delta\alpha_{O_2}(z_i)$

和差分吸收截面 $\Delta\sigma_{O_2}(z_i)$, 获取大气氧气分子密度 $n_{O_2}(z_i)$; 根据大气氧气分子密度 $n_{O_2}(z_i)$, 通过准静态方程, 计算新的大气压强廓线 $P(z_i)$, 再根据理想气体状态方程计算新的大气温度廓线 $T(z_i)$; 用第一轮计算出来的大气压强 $P(z_i)$ 和大气温度廓线 $T(z_i)$, 代替 U.S 1976 大气模型中的大气压强 $P(z_i)$ 和大气温度数值 $T(z_i)$, 进行第二轮循环的计算, 直至前后两次循环差值小于 0.3% 以下。

2.4 湿空气中的水汽分子密度 $n_{\text{H}_2\text{O}}(z_i)$ 的迭代计算

这里下标 1 和 2,指的是 935 nm 波段两个波长 $\lambda_{1\text{H}_2\text{O}}$ 和 $\lambda_{2\text{H}_2\text{O}}$ 。 $\lambda_{1\text{H}_2\text{O}}$ 位于测量的吸收线上 online, $\lambda_{2\text{H}_2\text{O}}$ 位于测量的非吸收线上 offline,用于标定不希望的现象。差分光学厚度实际上是两个不同波长的

光学厚度差,即

$$\tau_{1\text{H}_2\text{O}} - \tau_{2\text{H}_2\text{O}} = \ln\left(\frac{I_{10\text{H}_2\text{O}}}{I_{1\text{H}_2\text{O}}}\frac{I_{2\text{H}_2\text{O}}}{I_{20\text{H}_2\text{O}}}\right) \quad (20)$$

935 nm 的大气折射系数 $N_{935}(z_i)$ 可表示为

$$N_{935}(z_i) = \left(0.237104 + \frac{68.3934}{130 - 0.935^{-2}} + \frac{0.45473}{38.9 - 0.935^{-2}}\right) \times 6.59 \times 10^{-23} n_{\text{O}_2}(z_i) - 0.00038 \times n_{\text{H}_2\text{O}}(z_i) \times 1.3807 \times 10^{-23} T(z_i) \quad (21)$$

935 nm 折射率可表示为

$$\mu_{935}(z_i) = 1 + 10^{-6} \times N_{935}(z_i) \quad (22)$$

掩星光路径曲线的特征参数 a_{i935} 可表示为

$$a_{i935} = \mu(z_i)_{935} r(z_i) = \mu(z_i)_{935}(z_i + R_C) \quad (23)$$

由 Abel 变换得到的差分消光系数可表示为

$$\alpha_{1\text{H}_2\text{O}}(a_0) - \alpha_{2\text{H}_2\text{O}}(a_0) = -\frac{1}{\pi} \frac{da}{dr} \Big|_{a=a_0} \int_{a_0}^{\infty} \frac{d(\tau_{1\text{H}_2\text{O}} - \tau_{2\text{H}_2\text{O}})}{da} \frac{da}{(a^2 - a_0^2)^{1/2}} \quad (24)$$

水汽的消光系数差 $\alpha_{1\text{H}_2\text{O}} - \alpha_{2\text{H}_2\text{O}}$, 也即 $n_{\text{H}_2\text{O}} \times$

$(\sigma_{1\text{H}_2\text{O}} - \sigma_{2\text{H}_2\text{O}})$, 是水汽分子密度 $n_{\text{H}_2\text{O}}$ 的强函数, 是气压 $P(z_i)$ 和温度 $T(z_i)$ 的弱函数。压强 $P(z_i)$ 和温度 $T(z_i)$ 由 765 nm 掩星的数据给出。

$n_{\text{H}_2\text{O}}$ 水汽分子密度、 $\sigma_{1\text{H}_2\text{O}}$ 强吸收截面(对温度变化相对不敏感)、 $\sigma_{2\text{H}_2\text{O}}$ 弱吸收截面跟大气压强 $P(z_i)$ 和温度 $T(z_i)$ 都有关。

$$n_{\text{H}_2\text{O}}(z_i) = \frac{\alpha_{1\text{H}_2\text{O}}(z_i) - \alpha_{2\text{H}_2\text{O}}(z_i)}{\sigma_{1\text{H}_2\text{O}}(P, T) - \sigma_{2\text{H}_2\text{O}}(P, T)} \quad (25)$$

由(25)式计算的水汽的分子浓度分布 $n_{\text{H}_2\text{O}}$ 代入(21)式,进行新一轮迭代运算。水汽分子浓度的反演运算框图如图 4 所示。

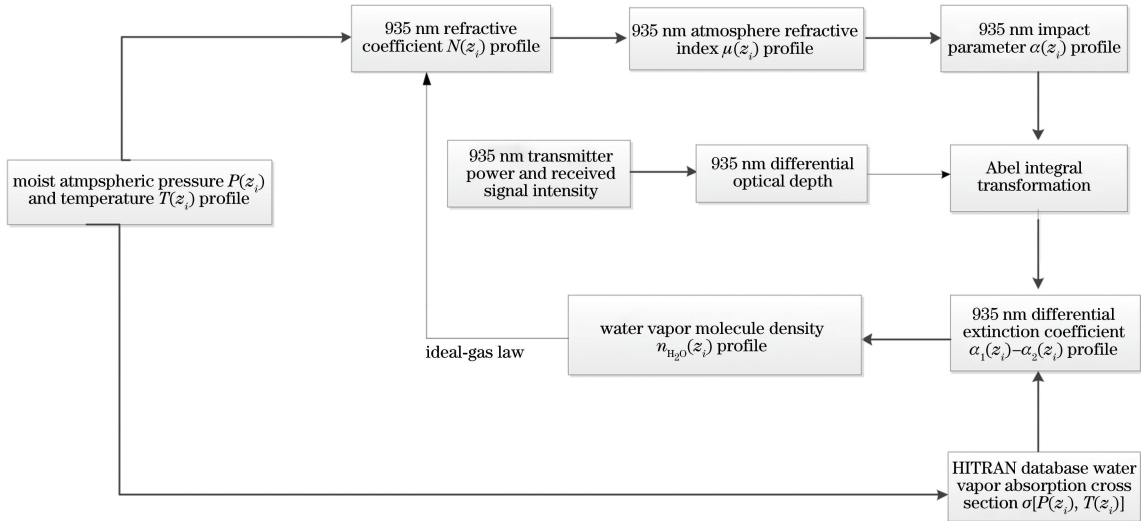


图 4 从 935 nm 激光掩星反演湿空气大气水汽分子浓度的计算流程图

Fig. 4 Flow chart for water vapor retrieval concentration from 935nm laser occultation

大致的计算步骤:由 765 nm 波段计算的大气压强 $P(z_i)$ 和大气温度 $T(z_i)$,计算大气的 935 nm 光折射系数廓线 $N_{935}(z_i)$,紧接着计算大气的 935 nm 光折射率 $\mu_{935}(z_i)$ 廓线、连接发射机和接收机的光线轨迹参数 $a_{935}(z_i)$ 廓线;差分光学厚度 $\Delta\tau_{\text{H}_2\text{O}}(z_i)$ 通过 Abel 变换,计算差分吸收系数 $\Delta\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(z_i)$,通过大气压强和大气温度查找

HITRAN 数据库获取差分吸收截面 $\Delta\sigma_{\text{H}_2\text{O}}(z_i)$,由差分消光系数 $\Delta\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(z_i)$ 和差分吸收截面 $\Delta\sigma_{\text{H}_2\text{O}}(z_i)$,获取大气水汽分子密度 $n_{\text{H}_2\text{O}}(z_i)$;用第一轮计算出来的大气水汽分子密度 $n_{\text{H}_2\text{O}}(z_i)$,代替前面假定的水汽分子密度,进行第二轮循环的计算,直至两次计算的结果差别在 3% 以内。

3 仿真结果

假定了一组 764.7 nm/764.9 nm 大气光透过率垂直廓线数据和一组 935.607 nm/935.390 nm 的大气光透过率垂直廓线数据;假定大气参数球对称,运用大气模型,计算出折射系数廓线;横向连接波长 765 nm/935 nm 的光学厚度数据由 Abel 积分方程模拟得到,再把模拟得到的差分光学厚度数值代入上述的迭代循环中,计算温度廓线和水汽廓线。

将 0.5% 的高斯噪声加入折射率数据以及将 0.4% 的高斯随机噪声加入光学厚度数据。把噪声加入模拟数据导致反演误差,如图 5~图 8 所示。高度为 4~14 km,水汽反演误差在图 5 中表示,约 5%;温度反演误差在图 6 中表示,一般低于 0.5%。

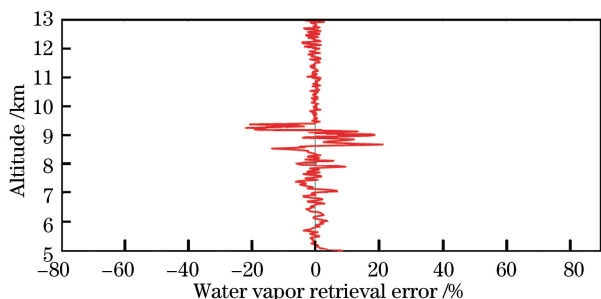


图 5 反演的水汽廓线误差

Fig. 5 Simulated laser occultation crosslink water vapor retrieval error

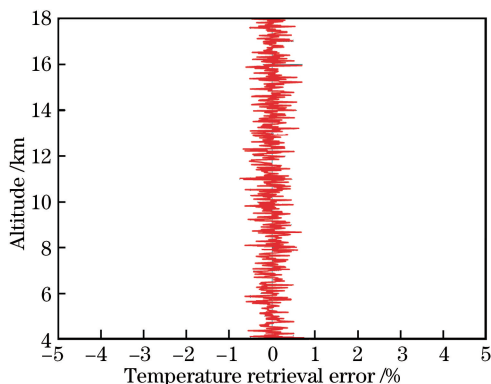


图 6 反演的温度廓线误差

Fig. 6 Simulated laser occultation crosslink temperature retrieval error

4 结 论

基于低轨道空间站和伴飞卫星,利用激光掩星来探测大气水汽混合比。反演的结果表明,利用 765 nm/935 nm 的横向连接光波长分析水汽-氧气激光掩星数据,在假定的条件下模拟效果很好,证实了 765 nm/935 nm 双波段激光掩星的工作原理。

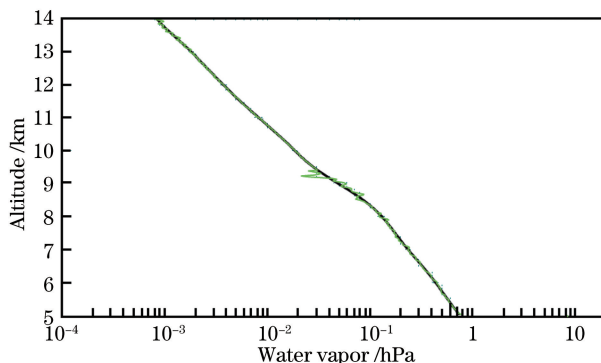


图 7 水汽的廓线:模型和反演结果对照

Fig. 7 Water vapor profiles: model and retrieved results

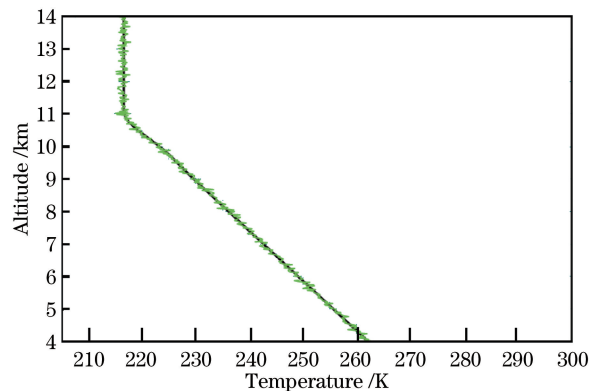


图 8 温度廓线:模型与反演结果对照

Fig. 8 Temperature profiles: model and retrieved results

在目标气体差分吸收波长对之外,引入混合比十分稳定的氧气的 A 吸收带的差分吸收波长对的激光掩星,可以发挥欧洲 ACCURATE 计划中微波掩星和红外激光掩星的复合作用。这些模拟研究没有包含激光掩星横向连接探测技术的所有方面,下步工作有必要进行深入研究。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所、中层大气和全球环境探测重点实验室李金华老师支持。

参 考 文 献

- [1] Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: early results [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89(3): 313-334.
- [2] Choi M S, Lee W K, Cho S K, et al. Operation of the radio occultation mission in KOMPSAT-5 [J]. Journal of Astronomy and Space Science, 2010, 27 (4):345-352.
- [3] Jin S G, Feng G P, Gleason S. Remote sensing using GNSS signals: current status and future directions [J]. Advances in Space Research, 2011, 47 (10): 1645-1653.

- [4] Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T, et al. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D19): 23429-23465.
- [5] Proschek V, Kirchengast G, Schweitzer S. Greenhouse gas profiling by infrared-laser and microwave occultation: retrieval algorithm and demonstration results from end-to-end simulations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(10): 2035-2058.
- [6] Li W D, Liu J Q, Zhu Y D, et al. LEO-LEO infrared laser occultation technique to measure atmospheric carbon dioxide concentration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0810001.
李文冬, 刘继桥, 朱亚丹, 等. LEO-LEO 红外激光掩星 CO₂ 浓度测量技术研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0810001.
- [7] Chuang T, Walters B, Shuman T, et al. Single frequency and wavelength stabilized near infrared laser source for water vapor DIAL remote sensing application[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9342: 93420J.
- [8] Riris H, Rodriguez M, Allan G R, et al. Pulsed airborne lidar measurements of atmospheric optical depth using the Oxygen A-band at 765 nm [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(25): 6369-6382.
- [9] Sokolovskiy, S. V, Modeling and inverting radio occultation signals in the moist troposphere [J]. *Radio Science*, 2001, 36: 441-458.
- [10] Kovalev V A, Eichinger W E. Elastic lidar: theory, practice, and analysis methods [M]. UK: John Wiley & Sons, 2004: 17-18.
- [11] Bönsch G, Potulski E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae[J]. *Metrologia*, 1998, 35(2): 133-139.